

# 气氧/煤油富燃燃气发生器积碳特性试验研究

张 锋<sup>1,2</sup>, 严 宇<sup>1,2</sup>, 杨伟东<sup>1,2</sup>, 杨尚荣<sup>1,2</sup>

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 开展了气氧/煤油富燃燃气发生器在混合比 0.25 ~ 0.50、室压 1.0 ~ 4.0 MPa 范围内的燃烧试验, 获得了混合比和室压对发生器碳烟生成及沉积特性的影响规律。试验表明, 在本研究范围内, 富燃燃气发生器内的燃烧未达到化学平衡状态。当混合比小于 0.4 时, 积碳量随混合比的增大略有增加, 但均不明显; 当混合比大于 0.4 时, 积碳量显著增加。在室压 1.0 ~ 4.0 MPa 范围内, 室压对碳烟的生成具有重要影响, 并存在一个介于 1.0 ~ 2.0 MPa 之间的临界压力, 当室压低于此临界压力时, 燃烧过程中无碳烟生成。

**关键词:** 煤油; 富燃燃气发生器; 碳烟; 临界压力

中图分类号: V434<sup>+</sup>.22-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374(2017)06-0076-06

## Experimental investigation on soot deposition in a fuel-rich GOX/kerosene gas generator

ZHANG Feng<sup>1,2</sup>, YAN Yu<sup>1,2</sup>, YANG Weidong<sup>1,2</sup>, YANG Shangrong<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** A series of combustion experiments were carried out using a fuel-rich GOX/kerosene gas generator, at mixture ratios from 0.25 to 0.50 and chamber pressures from 1.0 to 4.0 MPa. The effects of mixture ratio and chamber pressure on soot formation and deposition characteristics were obtained. The results showed that the state of chemical equilibrium was not attained in the combustion process. When mixture ratio is smaller than 0.4, soot deposition is not significant and increases with the increase of mixture ratio slightly; when mixture ratio is larger than 0.4, soot deposition increases remarkably. At chamber pressure from 1.0 to 4.0 MPa, soot formation is found to be strongly dependent on chamber pressure. There is a critical pressure for soot formation which is between 1.0 ~ 2.0 MPa. If chamber pressure is smaller than the critical pressure, there is no soot formation in the combustion.

**Keywords:** kerosene; fuel-rich gas generator; soot; critical pressure

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-07-21

基金项目: 重点实验室基金项目 (61427040101)

作者简介: 张锋 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为喷雾燃烧技术

## 0 引言

世界各国现有的液氧/煤油发动机主要有补燃循环和燃气发生器循环两种发动机系统方案。俄罗斯的 RD-120 和 RD-180 发动机及中国的 YF-100 和 YF-115 发动机等液氧/煤油发动机均采用了补燃循环<sup>[1]</sup>, 除了发动机总体比冲性能较高之外, 由于采用了富氧燃气发生器, 还避免了富燃燃气发生器存在的积碳问题。美国的 F1, H1 和 Merlin 系列发动机和俄罗斯 RD-108 和 RD-111 发动机等液氧/煤油发动机则采用了燃气发生器循环<sup>[2-3]</sup>, 虽然该循环发动机比冲较低, 但由于其系统相对简单、工作更可靠、生产使用成本较低, 仍具有一定的生存空间。对于燃气发生器循环液氧/煤油火箭发动机来说, 富燃燃气发生器的积碳问题是必须解决的技术难题, 以避免过多的积碳影响涡轮的正常工作。

上世纪 80、90 年代, 美国针对液氧/煤油发动机富燃燃气发生器的积碳问题进行了大量研究工作。Lawver<sup>[4-5]</sup>开展了液氧/煤油富燃燃气发生器混合比范围 0.238 ~ 0.367、室压范围 8.9 ~ 17.5 MPa 的积碳试验, 通过测量安装在发生器收敛段前的涡轮模拟件前、后压差随试验时间的变化以推算涡轮模拟件流通面积的变化, 进而得到模拟件通道壁面上积碳厚度随时间的变化。然而, 由于涡轮模拟叶片受热膨胀同样会造成涡轮模拟件流通面积的减小, 因此, 很难通过涡轮模拟件流通面积的减小准确确定其壁面的积碳速率。如果将测量得到的流通面积的减小完全归因于积碳的话, 该试验得到的相同混合比条件下的积碳速率是太阳神 I 发动机燃气发生器积碳速率的 2 ~ 4 倍。Merlyn 等人<sup>[6]</sup>借鉴了 Lawver 的试验方法开展了混合比范围 0.25 ~ 1.0、室压范围为 5 ~ 10 MPa 的液氧/煤油富燃积碳试验, 重点研究了混合比与室压对积碳特性的影响。其试验结果表明, 混合比 0.34 与 0.25 时的积碳速率基本相当且均不太明显, 而混合比增大至 0.57 时, 积碳速率明显增大; 此外, 在相同混合比情况下, 室压对积碳速率的影响不明显, 且无明显规律。随后, 美国 Aerojet 公司针对液氧/煤油、液氧/丙

烷和液氧/甲烷富燃燃气发生器的积碳问题进行了大量试验研究<sup>[7]</sup>。其试验结果表明, 在所研究条件范围内 (混合比 0.2 ~ 0.6、室压 5 ~ 11.5 MPa), 混合比是影响积碳速率的主要因素, 压力的影响很小; 当混合比小于 0.4 时, 液氧/煤油与液氧/丙烷的积碳均不明显; 液氧/甲烷在混合比 0.2 ~ 0.6 范围内均不存在积碳问题。上述试验结果<sup>[4-7]</sup>均表明, 在混合比较低时, 液氧/煤油富燃燃烧过程由液滴蒸发和化学动力学双重因素控制, 并未达到化学平衡状态, 受此影响, 实际碳烟生成量与燃气温度和特征速度一样, 均明显低于化学平衡模型的预测结果。

在碳烟生成机理及其仿真研究方面, 直到上实际 80 年代初, 对于碳烟的反应生成路径仍然是未知的。1984 年, Frenklach<sup>[8-11]</sup>通过大量实验和理论研究, 提出了一套目前被广泛采用的碳烟生成路径及机理, 该机理认为, 燃烧过程中碳烟的生成与前驱物 PAH (多环芳香烃, 如芘  $C_{16}H_{10}$ ) 的产率密切相关。前驱物 PAH 相互碰撞而发生二聚反应, 并形成初始的碳烟颗粒。乙烯对初始二聚物的生成起了决定性作用。在该机理中, 碳烟的生成过程包含了四个过程: 晶核形成、凝结、表面生长和氧化。1992 年, Nickerson 和 Johnson<sup>[2,12]</sup>在上述碳烟生成机理基础上对 TDK 计算程序进行了改进, 并对可能会生成碳烟的液氧/烃 (煤油、甲烷、丙烷) 富燃燃烧室进行了性能计算。结果表明, 改进后的程序可以准确预测上述三种推进剂组合的富燃燃气发生器的性能参数和混合比对燃气中碳烟质量含量的影响规律, 碳烟的生成过程主要取决于温度和混合比, 受压力的影响较弱。2004 年, 韩国的 Lee 和 Yu<sup>[13]</sup>采用文献 [14] 给出的煤油燃烧详细反应机理以及 Frenklach 提出的碳烟生成机理发展出了一套液氧/煤油富燃燃烧非平衡化学反应计算模型, 并对混合比 0.3 ~ 0.4 范围内碳烟生成情况进行了仿真预测。其仿真结果表明, 在该混合比范围内, 燃气中碳烟的体积分数小至可以忽略, 仅为  $10^{-9}$  量级。该结果与文献 [2] 的计算结果一致。

国内有关液氧/煤油富燃燃烧的研究较少。

本文作者开展了气氧/煤油富燃燃气发生器燃烧试验,研究了气氧/煤油富燃燃气发生器的热力特性<sup>[16]</sup>和积碳特性。本文将主要介绍积碳特性方面的研究成果。

1 试验装置与试验工况

1.1 试验装置

气氧/煤油富燃燃气发生器结构为内径 Φ40 的热沉结构 (见图 1), 主要由喷注器、圆柱段、扰流环、涡轮叶片模拟件、喷管段等部分组成。燃气发生器采用火花塞进行点火, 火花塞位于喷注器的中心位置, 在其周围安装有 3 个气氧/煤油同轴直流离心喷嘴。在文献 [16] 中已经对喷嘴的主要结构尺寸以及试验中压力、流量、温度等参数的测量方法进行了详细介绍, 此处不再赘述。

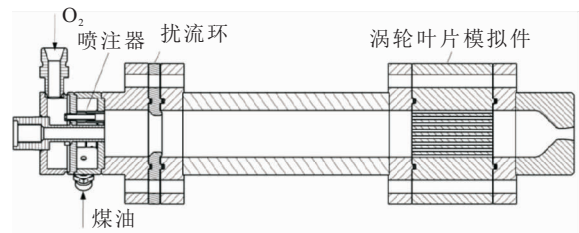


图 1 富燃燃气发生器结构示意图

Fig. 1 Schematic of the fuel-rich gas generator system

涡轮叶片模拟件安装在发生器圆柱段和喷管段之间。随着试验时间的延续, 流经叶片间燃气通道的燃气中的碳烟将逐渐在叶片壁面上沉积, 随着碳烟沉积厚度的增大, 燃气流通面积不断减小, 模拟件前、后的压差将逐渐增大, 由此可以反推出碳烟厚度随时间的变化规律。文献 [4 – 6] 均基于此实现了对叶片壁面上积碳厚度的测量。但该方式对测量模拟件前、后压差的压力传感器的测量精度要求很高。本文采用了称重法, 即测量涡轮模拟件试验前后重量求其差值的方式以获得各试验工况的涡轮叶片模拟件中的积碳质量。

1.2 试验工况

本试验的主要目的在于考察混合比及室压对气氧/煤油富燃燃气发生器碳烟生成与沉积特性

的影响, 因此, 试验分为两部分: 混合比影响试验 (Test I) 和室压影响试验 (Test II)。混合比影响试验中, 室压均为 3 MPa, 混合比变化范围为 0.25 ~ 0.50; 室压影响试验中, 混合比均为 0.4, 室压变化范围为 1.0 ~ 4.0 MPa。具体试验工况分别见表 1 和表 2 所示 (表中  $p_c$  为室压;  $K$  为混合比;  $\dot{m}_o$  和  $\dot{m}_f$  分别代表氧气流量和煤油流量;  $D_t$  为燃烧室喉部直径;  $t$  为燃烧试验持续时间。表中工况参数均为目标值, 实际值略有差异)。

表 1 混合比影响试验工况表  
Tab. 1 Operating conditions of Test I

Test	$p_c$ / MPa	$K$	$\dot{m}_o$ / ( $g \cdot s^{-1}$ )	$\dot{m}_f$ / ( $g \cdot s^{-1}$ )	$D_t$ / mm	$t$ /s
Test_ I_ 1	3.0	0.25	63.5	254.0	9.5	30
Test_ I_ 2	3.0	0.30	64.4	214.8	9.5	30
Test_ I_ 3	3.0	0.35	64.9	185.5	9.5	30
Test_ I_ 4	3.0	0.40	66.4	166.0	9.5	30
Test_ I_ 5	3.0	0.45	67.5	150.0	9.5	30
Test_ I_ 6	3.0	0.50	68.0	136.0	9.5	30

表 2 室压影响试验工况表  
Tab. 2 Operating conditions of Test II

Test	$p_c$ / MPa	$K$	$\dot{m}_o$ / ( $g \cdot s^{-1}$ )	$\dot{m}_f$ / ( $g \cdot s^{-1}$ )	$D_t$ / mm	$t$ /s
Test_ II_ 1	1.0	0.40	45.6	114.0	13.5	30
Test_ II_ 2	2.0	0.40	66.2	165.5	11.5	30
Test_ II_ 3	3.0	0.40	66.4	166.0	9.5	30
Test_ II_ 4	4.0	0.40	88.5	221.3	9.5	30

2 试验结果与分析

2.1 混合比对碳烟生成及沉积特性的影响

图 2 给出了混合比影响试验 (Test I) 各工况尾气排放照片。从图中可以看出, 在室压 3.0 MPa、混合比 0.25 ~ 0.50 范围内, 随着混合比的增大, 尾气的颜色由浅灰色逐渐变为深灰色, 并最后变为浓黑色, 说明在此混合比范围内尾气中均有一

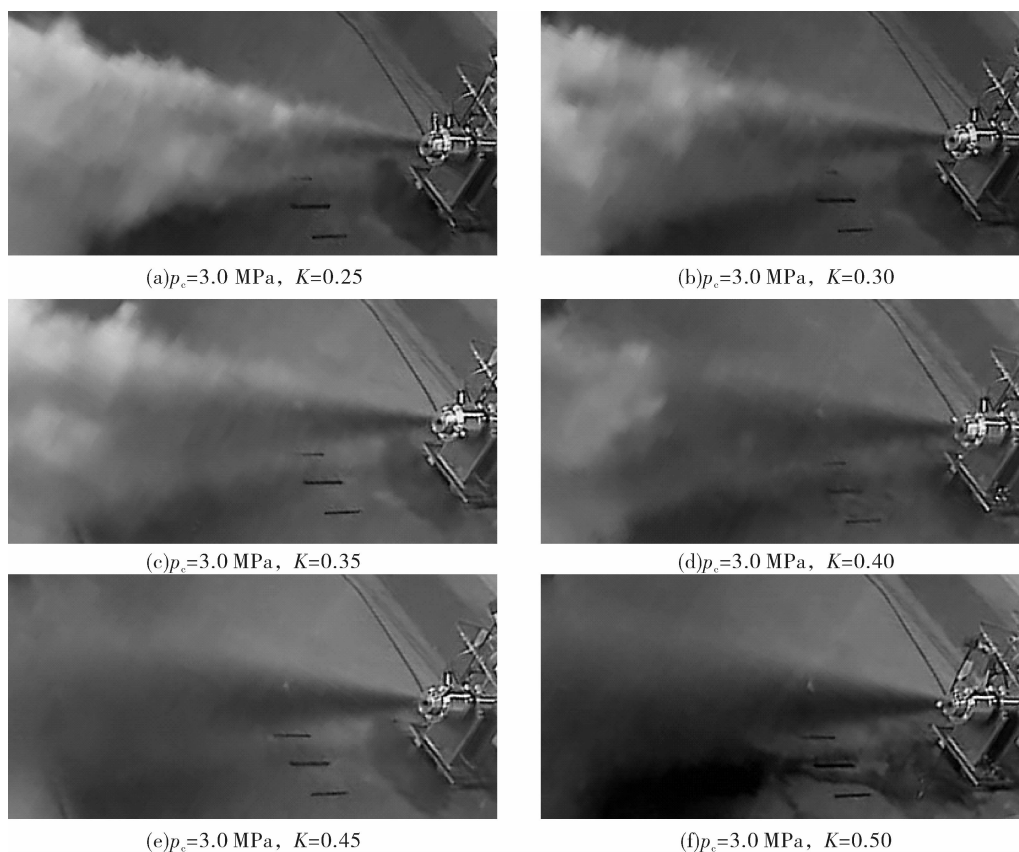


图2 混合比影响试验尾气照片

Fig. 2 Plume photos of Test\_ I

定程度的碳烟存在, 而且尾气中的碳烟含量随着混合比的增大而逐渐增大; 这一趋势在混合比超过 0.4 之后, 变化更加明显。该变化趋势与各工况涡轮叶片模拟件的积碳量变化趋势也是相互吻合的, 如图 3 和图 4 所示。由图 4 可以看出, 当混合比小于 0.4 时, 积碳量随混合比的增大略有增

加, 但总体相对较少; 当混合比大于 0.4 时, 积碳量显著增加。这一变化趋势与文献 [6] 和 [7] 的试验结果是一致的, 这与基于化学平衡理论预测的变化趋势恰恰相反, 如图 4 所示。这说明, 在本实验研究的混合比工况条件下, 氧气与煤油的燃烧反应未达到化学平衡状态。

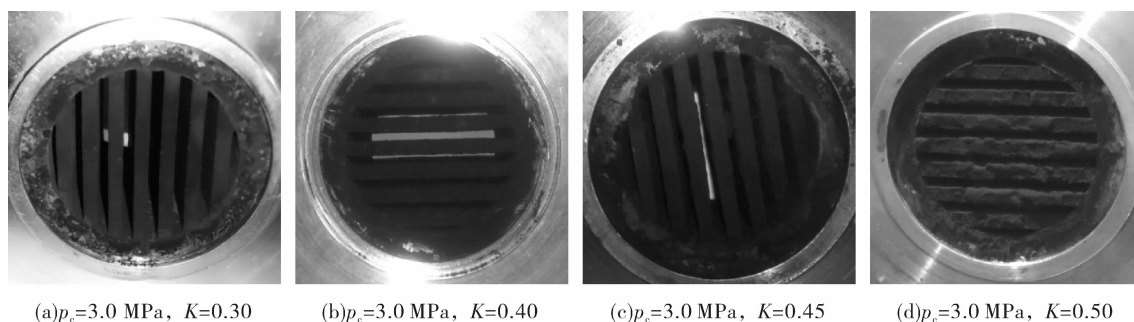


图3 涡轮叶片模拟件试后照片

Fig. 3 Turbine simulator post test

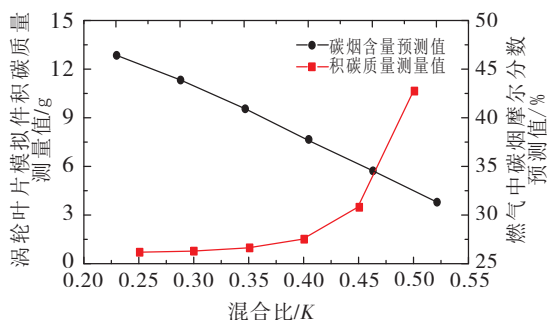


图4 涡轮叶片模拟件积碳质量测量值和燃气中碳烟摩尔分数预测值随混合比的变化

Fig. 4 Mass of soot deposited in turbine simulator and mass of soot predictions vs.  $K$

## 2.2 室压对碳烟生成及沉积特性的影响

图5给出了室压影响试验 (Test II) 各工况尾气排放照片。从图中可以看出, 在混合比 0.4 的情况下, 室压为 2.0 MPa, 3.0 MPa 和 4.0 MPa 时, 均呈现出了不同程度的灰色, 而且随着室压

的增大, 尾气颜色逐渐加深, 说明尾气中的碳烟含量随室压的增大而逐渐增大。然而, 室压为 1.0 MPa 时, 尾气则与上述 3 个室压时的尾气显著不同, 呈现的完全是“白色蒸气”状, 丝毫看不出有碳烟的存在。上述 4 个工况涡轮叶片模拟件试验前后的重量变化如图所示, 可见积碳量的随室压的变化趋势与尾气的变化趋势是一致的。由此可以认为, 在混合比 0.4、室压 1.0~4.0 MPa 的范围内, 室压对碳烟的生成有重要影响, 存在一个介于 1.0~2.0 MPa 之间的临界压力, 当室压低于此临界压力时, 燃烧过程中无碳烟生成, 而当室压高于此临界压力时, 燃气中的碳烟含量随着室压的增大而增大。由于本文只开展了混合比为 0.4 条件下的室压对碳烟生成及沉积特性的影响试验, 因此, 其它混合比条件下, 是否仍存在上述临界压力以及临界压力值随混合比如何变化等问题需要后续开展进一步的试验研究。



(a)  $p_c = 1.0$  MPa,  $K = 0.40$



(b)  $p_c = 2.0$  MPa,  $K = 0.40$



(c)  $p_c = 3.0$  MPa,  $K = 0.40$



(d)  $p_c = 4.0$  MPa,  $K = 0.40$

图5 室压影响试验尾气照片

Fig. 5 Plume photos of Test\_ II

室压对积碳特性的上述影响规律与文献 [6] 和 [7] 的“室压对积碳速率的影响不明显”的研究结论不一致, 但两者并不矛盾。这是因为由于本文与后者试验的室压范围不同导致的。由图 6 可以看出, 虽然积碳速率随着室压的增大而不断增大, 但增大幅度随着室压的增大而逐渐减

小, 可以预期, 随着室压的继续增大, 其对积碳速率的影响将变得不再明显, 这将与文献 [6] 和 [7] 的结论是一致的。

## 3 结论

本文通过对以气氧/煤油富燃燃气发生器的积



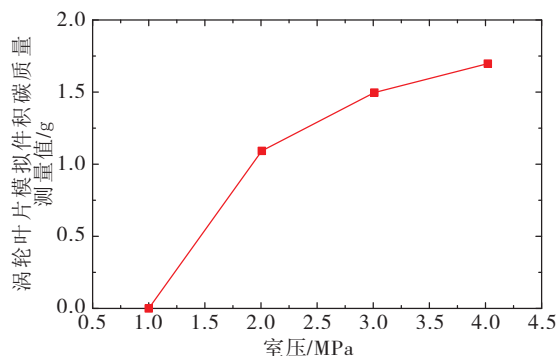


图6 涡轮叶片模拟件积碳量随室压的变化

Fig. 6 Mass of soot deposited in turbine simulator vs.  $p_c$ 

碳试验, 得出以下结论:

1) 室压为 3 MPa 的情况下, 当混合比小于 0.4 时, 积碳量随混合比的增大略有增加, 但总体而言相对较少; 当混合比大于 0.4 时, 积碳量显著增加。

2) 在本试验研究范围内, 氧气与煤油的燃烧反应未达到化学平衡状态, 碳烟含量随混合比的变化趋势与化学平衡理论预测结果相反。

3) 混合比为 0.4 的情况下、在室压 1.0 ~ 4.0 MPa 的范围内, 室压对碳烟的生成有重要影响, 并且存在一个介于 1.0 ~ 2.0 MPa 之间的临界压力, 当室压低于此临界压力时, 燃烧过程中无碳烟生成; 而当室压高于此临界压力时, 燃气中的碳烟含量随着室压的增大而增大, 但增大程度随着室压的增大而逐渐减小。

4) 后续将进一步开展更大混合比范围内及更高室压条件下的碳烟生成及沉积特性的试验研究。

#### 参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧/煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] NICKERSON G R, JOHNSON C W. A soot prediction model for the TDK computer program, AIAA 92-3391 [R]. Reston: AIAA, 1992.

- [3] VOZOFF M, COULURIS J. Space X products-advancing the use of space, AIAA2008-7836 [R]. Reston: AIAA, 2008.
- [4] LAWVER B R. Test verification of LOX/RP-1 high-pressure fuel/oxidizer rich preburner designs, AIAA82-1153 [R]. Reston: AIAA, 1982.
- [5] LAWVER B R. Testing of a fuel/oxidizer rich high pressure pre-burner, NASA CR-165609 [R]. Madison: Aerojet TechSystems Corporation, 1982.
- [6] MERLYN F L, DON C R, et al. Carbon deposition with LOX/RP-1 propellants, AIAA-85-1164 [R]. Reston: AIAA, 2008.
- [7] HERMANDEZ R, MERCER S D. Carbon deposition characteristics of  $\text{LO}_2/\text{HC}$  propellants, AIAA-87-1855 [R]. Reston: AIAA, 1987.
- [8] FRENKLACH M, RAMACHANDRA M K, MATULA R A. Soot formation in shock-tube oxidation of hydrocarbons [J]. Symposium on combustion, 1985, 20(1): 871-878.
- [9] FRENKLACH M. Final technical report on kinetics and mechanism of soot formation in hydrocarbon combustion, NAG 3-668 [R]. Washington: NASA, 1990.
- [10] BOCKHORN H. Soot Formation in combustion, mechanisms and models [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [11] FRENKLACH M. Mechanism of PAH and soot formation and growth [R]. Roam and Haas, Houston, Texas: Conference on Mechanistic Aspects of PAH and Soot Chemistry, 1988.
- [12] NICKERSON G R, JOHNSON C W. The chemical kinetics of LOX/hydrocarbon combustion, NAS8-38052 [R]. Washington: NASA, 1989.
- [13] SONM, Son, KOO J. Conceptual design for a kerosene fuel-rich gas-generator of a turbopump-fed liquid rocket engine [J]. Journal of thermal science 2012, 21(5): 428-434.
- [14] LEEC J, YU J M, KOO J Y. Prediction of non-equilibrium kinetics of fuel-rich kerosene/LOX combustion in gas generator, AIAA2007-574 [R]. Reston: AIAA, 2007.
- [15] DAGAUT P. On the kinetics of hydrocarbons oxidation from natural gas to kerosene and diesel fuel [J]. Phys. Chem., 2002, 4(11): 2079-2094.
- [16] 张锋, 严宇, 王延涛, 等. 气氧/煤油富燃燃气发生器燃烧试验研究 [J]. 推进技术, 2016, 37(10): 1916-1921.

(编辑: 陈红霞)